

高速冲击下人体颈椎与椎间盘接触应力分析

姜文, 薛强, 张向颖
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 建立了人体头颈部有限元生物力学模型,并在颈椎与椎间盘间设置接触.以15g加速度载荷施加于头颈部有限元模型的头部,进行高速冲击有限元分析,得出颈椎与椎间盘的接触应力分布情况.结果表明:高速冲击下C6、C7间易发生椎间盘突出;在头颈部有限元模型中设置接触条件,可以更好地模拟头颈部的生理特性和动力学响应情况.

关键词: 有限元; 头颈部; 接触问题; 高速冲击

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2012)04-0057-03

Analysis of Contact Stress Between Cervical Vertebra and Intervertebral Disc of Human on High-speed Impact

JIANG Wen, XUE Qiang, ZHANG Xiangying
(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The finite element biomechanical model of the human head and neck was established, and the contact between the cervical vertebrae and the intervertebral disc was set. A load of 15 g acceleration was imposed on the head of the model, the finite element model on high speed impact was analysed, and the contact stress distribution between the cervical vertebra and intervertebral disc was got. The results show that under high speed impact, protrusion of intervertebral disc is easy to occur between C6 and C7, and the finite element model of the head and neck set in contact conditions can better simulate the head and neck physiological characteristics and the dynamic response.

Key words: finite element; head and neck; contact problem; high-speed impact

在各种类型的冲击碰撞过程中,人体头颈部是最易受到损伤的部位.在高速冲击事故中,头颈部损伤不仅具有高发性,而且事故幸存者往往有长期后遗症.建立人体头颈部有限元模型以进行冲击碰撞分析,研究头颈部的动力学响应及损伤情况,从而最大限度地减轻冲击造成的头颈部伤害,具有重要意义.

在有限元分析中,接触条件是一种特殊的不连续的约束,它允许力从模型的一部分传递到另一部分.只有当两个表面发生接触时才会有接触约束的产生,而当两个接触的面分开时,约束就自动解除了,所以这种约束是不连续的.在进行人体冲击有限元分析时,必须考虑人体组织的接触问题,对接触问题的理解将直接影响有限元建模过程中单元类型、参数的选取以及计算的可靠性.如果不考虑接触条件,则不能很好地模拟头颈部关节的运动和受力情

况.2004年, Mayer等^[1]开发了一个有限元模型,模拟了头颈部的前撞击、后撞击、斜撞击和侧向撞击,并进行了模态分析和优化.2008年, Greaves等^[2]建立一个颈椎和脊柱的三维有限元模型,研究颈部的损伤机理.2011年, Toosizadeh等^[3]建立颈部有限元模型,分析肌肉受力的情况和内部载荷.但是他们并没有讨论颈椎关节的接触问题.2005年, Zhang等^[4]利用一个68岁男性尸体的标本,建立人体头颈部三维有限元模型,并在齿突、C1—C7关节突设置接触进行分析,但没有进一步说明接触问题是怎样解决的,对于颈椎与椎间盘的接触问题也没有讨论.

本文建立了一个能够反映人体结构基本特征和描述人体运动基本规律的人体头颈部三维有限元模型,对颈椎及与之相连的椎间盘间设置接触条件,进行高速冲击条件下的有限元分析,得出颈椎与椎间盘

的接触应力情况,并进行颈椎和椎间盘的损伤分析.

1 建立模型

用一个身高 1.7 m,体质量 70 kg 的中国成年男子为样本,通过螺旋 CT 扫描生成 DICOM 格式图像数据,使用 Mimics 将 CT 图像转换成三维模型,再利用 Geomagic 进行三维重建,得到人体头颈部的几何模型. 在三维有限元分析中,六面体单元由于变形特性好,刚性比四面体单元低,能较好地避免单元内形成尖锐夹角,可以提高有限元分析的可靠性和计算精度,并缩短计算时间. 本文中将几何模型导入 TrueGrid 和 HyperMesh 中划分网格,生成了六面体单元的有限元模型,如图 1 所示. 该模型能够反映人体结构基本特征和描述人体运动基本规律,模型包括:颅骨、脑组织、C1—C7 颈椎、T1 胸椎、椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、棘间韧带、棘上韧带、项韧带、黄韧带、横突间韧带、斜方肌、肩胛提肌、胸锁乳突肌和颈深肌群等肌肉群. 分别采用实体单元、索单元来构建. 其中实体单元 32 323 个,索单元 154 个. 模型中的生物材料属性和本构关系主要根据文献[1-6]设置. 在颈椎与椎间盘之间设置面面接触,摩擦因数取 0.1^[7].

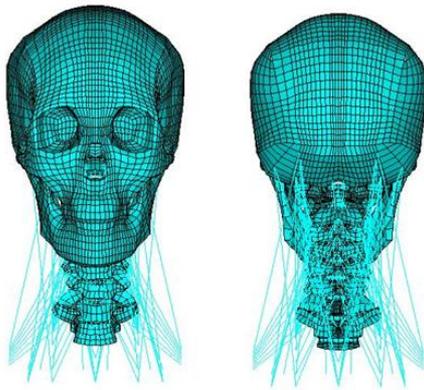


图 1 头颈部有限元模型
Fig. 1 Finite element model of the head and neck

2 接触边界条件的施加

采用对称罚函数接触算法进行分析模拟. 罚函数法最早是由 Courant 等^[8]引入的,其目的是求解带约束的泛函极值问题,1982 年开始应用于 LS-DYNA 程序. 现在该方法已发展为一种常用的接触算法,在数值计算中被广泛应用. 它的基本原理是:在每一个

时间步首先检查各从节点是否穿透主面,如果没有穿透不做任何处理;如果穿透,则在该从节点与被穿透主面间引入一个较大的界面接触力,其大小与穿透深度、主面的刚度成正比,以限制从节点对主面的穿透. 引入的接触力称为罚函数值. 对称罚函数法则是同时对每个主节点也作类似处理. 在接触算法中,对称罚函数法编程简单,且由于具有对称性、动量守恒准确,不需要碰撞和释放条件,因此很少激起网格沙漏效应,噪声小,是最常用的算法.

在颈椎与椎间盘之间设置面面接触,提取颈椎与椎间盘接触面上的节点,使相互接触的两个表面之间的节点形成点对,以此设置面面接触条件. 如图 2 所示椎间盘 A 和颈椎 B 互相接触, S_C 是该时刻两物体互相接触的界面,此界面在两物体中分别是 S_A 和 S_B . 定义椎间盘 A 为接触体,颈椎 B 为目标体;称 S_A 和 S_B 分别为从接触面和主接触面. 接触面 S_A 和 S_B 上在 S_C 相互接触的两个点分别为从、主接触点,接触力分别是 F_A 和 F_B ,接触点的瞬时速度分别是 v_A 和 v_B . 根据接触问题应该遵守的运动学和动力学条件,应有

$$\begin{cases} F_A^N + F_B^N = 0 \\ F_A^T + F_B^T = 0 \end{cases} \text{ 和 } \begin{cases} v_A^N + v_B^N = 0 \\ v_A^T + v_B^T = 0 \end{cases}$$

式中: N、T 分别代表法向和切向分量.

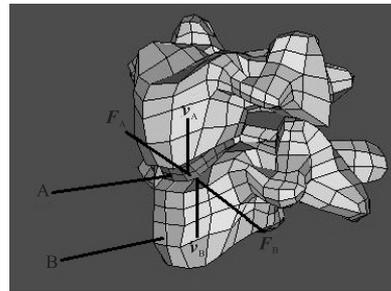


图 2 接触界面上的力和速度
Fig. 2 Forces and speed on the contact interface

3 仿真实验

1976 年, Ewing 等^[9]在美国海军生物力学实验室进行了志愿者滑车实验. 实验中刚性座椅被固定在滑车上, 志愿者由双肩皮带约束在座椅上, 在 15 g 的加速度载荷条件下进行了碰撞实验, 测试记录了碰撞过程中头部相对于 T1 胸椎的速度参数, 以此作为载荷条件施加于本文建立的模型, 在仿真运动过程的前半段头部模型相对于颈部模型水平前移, 约在 150 ms

时,颈部模型向前弯曲至最大位移处,此时颈椎模型前屈至极限位置,之后模型回弹至初始位置.图3所示为头部相对于T1在竖直方向上的位移曲线,与志愿者实验结果相比较,模型的运动过程与实验情况基本符合.以15g加速度载荷施加于头颈部有限元模型上进行正面碰撞模拟,得到颈椎椎体表面最大接触应力,见表1.C6和C7与椎间盘间的接触应力最大,其接触应力曲线见图4和图5.

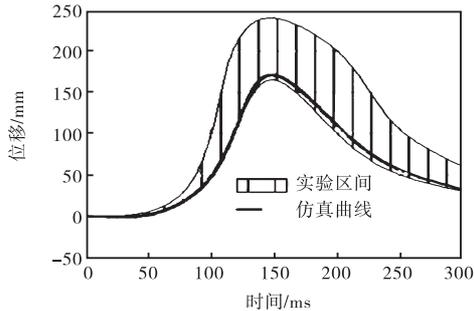


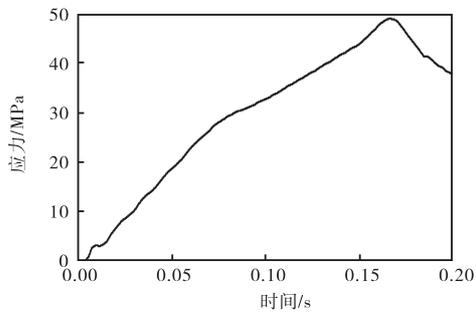
图3 头部相对于T1在竖直方向的位移

Fig. 3 Vertical displacement of the head relative to T1

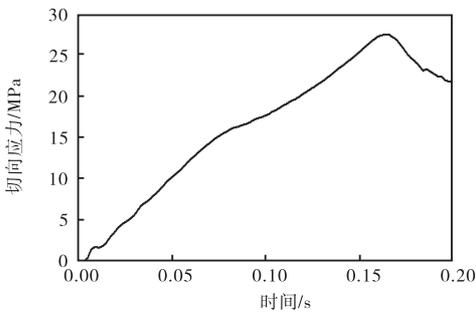
表1 各椎骨表面最大接触应力

Tab. 1 The max contact stress of each vertebra MPa

椎骨	C2	C3	C4	C5	C6	C7	T1
上表面	—	24.7	24.2	28.1	39.7	46.1	29.2
下表面	23.8	25.4	26.6	38.3	48.7	32.8	—



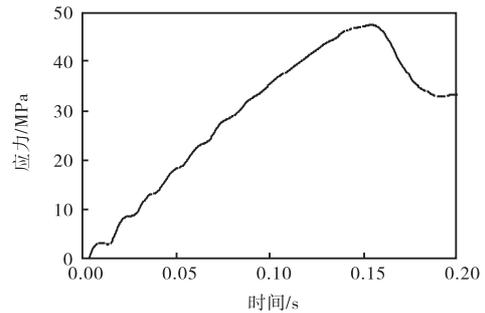
(a) 椎体下表面接触应力



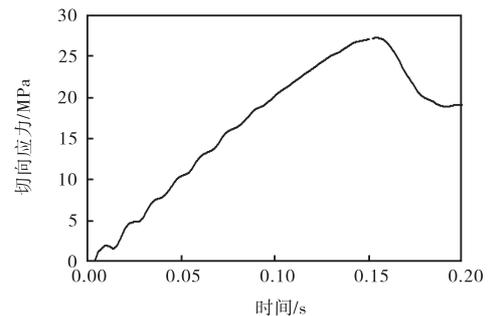
(b) 椎体下表面切向接触应力

图4 C6颈椎椎体表面接触应力曲线

Fig. 4 Contact stress curve of C6 vertebral surface



(a) 椎体上表面接触应力



(b) 椎体上表面切向接触应力

图5 C7颈椎椎体表面接触应力曲线

Fig. 5 Contact stress curve of C7 vertebral surface

4 结果分析

由表1可知,在冲击过程中,C6椎体下表面、C7椎体上表面的接触应力最大,其中C7下表面接触应力达到48.7 MPa,出现在约150 ms,也就是在颈部模型产生最大位移时;接触应力较大的是C6椎体上表面、C5椎体下表面,其中C6椎体上表面接触应力达到39.7 MPa;其次是椎骨T1,为29.2 MPa;接触应力较小的椎骨是C2、C3和C4,均为20 MPa左右,都是出现在颈部模型产生向前最大位移时.

人体颈部在承受较大冲击载荷时,颈椎的过度曲伸可使近侧椎体向后移位,使椎间盘后方张力增加,导致纤维环和后纵韧带破裂,髓核突出^[10].正常人在压缩外力作用下,椎间盘承受能力很强,但对剪切扭曲的抵抗力较弱,剪切扭曲的作用使椎间盘突出发生的概率更大.C6和C7椎体表面的接触应力最大,C6、C7和椎间盘间的切向应力达到27 MPa,C6、C7间的椎间盘可能会发生椎间盘突出.

C6椎体下表面的应力值为48.7 MPa,若继续增大,超过颈椎骨耐受极限,则会造成椎体爆裂性骨折.考虑到模型的验证和仿真结果,在头颈部有限元模型中设置接触条件可以更好地模拟头颈部的生理

(下转第64页)